

客観解析における日射補正*

小室 肇**・野村 厚***

1. はじめに

世界中で観測された気象データは、世界通信組織 (GTS) 回線を通して全球データ処理組織 (GDPS) の各センターに通報され、数値予報を行う基礎データとなっている。数値予報を行うには、まずこれらのデータから規則的に配列された格子点上の値を求めることが必要であり、この解析は客観解析と呼ばれている。現在気象庁で行っている客観解析の方法は、対流圏・成層圏解析とも最適内挿法を用い、また全球解析では6時間の4次元データ同化システムを形成している。解析精度の向上や4次元データ同化の発展とともに、客観解析資料は本来の目的である数値予報の初期値としてだけでなく、全球的な気候変動の監視や検出などの研究にも不可欠となってきている。

しかし、通報されるデータには測器自体の誤差や人為的なミスによる誤差なども含まれており、客観解析の前にこれらの誤差を検出する品質管理が必要となる。品質管理は、客観解析の精度を高め、ひいては予報精度を高めるためにも、極めて重要なことである。世界気象機関 (WMO) は、各 GDPS センターで行うべき品質管理の内容を Guide on the GDPS (WMO, 1982) に示しており、その内容を踏まえて各センターでは通報データの品質管理をリアルタイム・ノンリアルタイムで実施している。数値予報課における品質管理の具体的内容については、柏木 (1990) が報告している。

数値予報を行う上で重要な観測データの一つである高層データは、世界の約900地点で観測され、観測測器であるレーウィンゾンデは世界で約20種類ほどある。高層データに含まれる誤差のうち、気温センサーに生ずる系統的な誤差は、気温そのものだけでなく、数値

予報にとって重要なパラメータである高度にも影響を与えることとなる。この系統的な誤差の原因としては、短波放射によるもの、長波放射によるもの、測器システム特有の誤差の3つが考えられる。短波放射によるものは、気温センサーが日射を受け、実際の周囲の気温よりも高い測定値を示すものである。長波放射によるものは、大地や雲からの赤外放射をセンサーが受けて実際よりも高い測定値となる場合と、逆にセンサーからの赤外放射により冷却し、実際よりも低い測定値となる場合とがある。測器システム特有の誤差とは、例えばセンサーの応答の遅れや、気球から測器を吊り下げている紐が短いため、気球の熱航跡の影響を受ける (鈴木・旭, 1978, Ivanov *et al.*, 1991) ことなどが考えられる。これらの系統的な誤差は、観測処理のときに修正されるのがベストであるが、これらを修正して通報している国は一部にすぎないのが実状である。

これらの系統的な誤差は、客観解析の前処理で行う一観測地点の電文内の鉛直整合性チェックにおいて検出することは不可能である。また、この系統誤差は測器の種類により同程度に発生するもので、一国内では大抵同じ種類のレーウィンゾンデを使用しているため、水平的なチェックにおける検出も困難である。しかし、もしこの系統誤差の値が予めわかっているならば、品質管理において観測値を解析処理から削除するのではなく、その成分を元の観測値から取り除くことにより、積極的に利用することが可能となる。これが、レーウィンゾンデのバイアス補正である。

現在、数値予報課では、これら系統誤差の中で短波放射によるもののみ補正を行っており、日射補正と呼んでいる。この日射補正スキームは統計的な処理であり、平木により1983年に導入されている (Kanamitsu, 1984)。その補正量は、観測地点やレーウィンゾンデが変更されたときなど、必要に応じて更新されている。

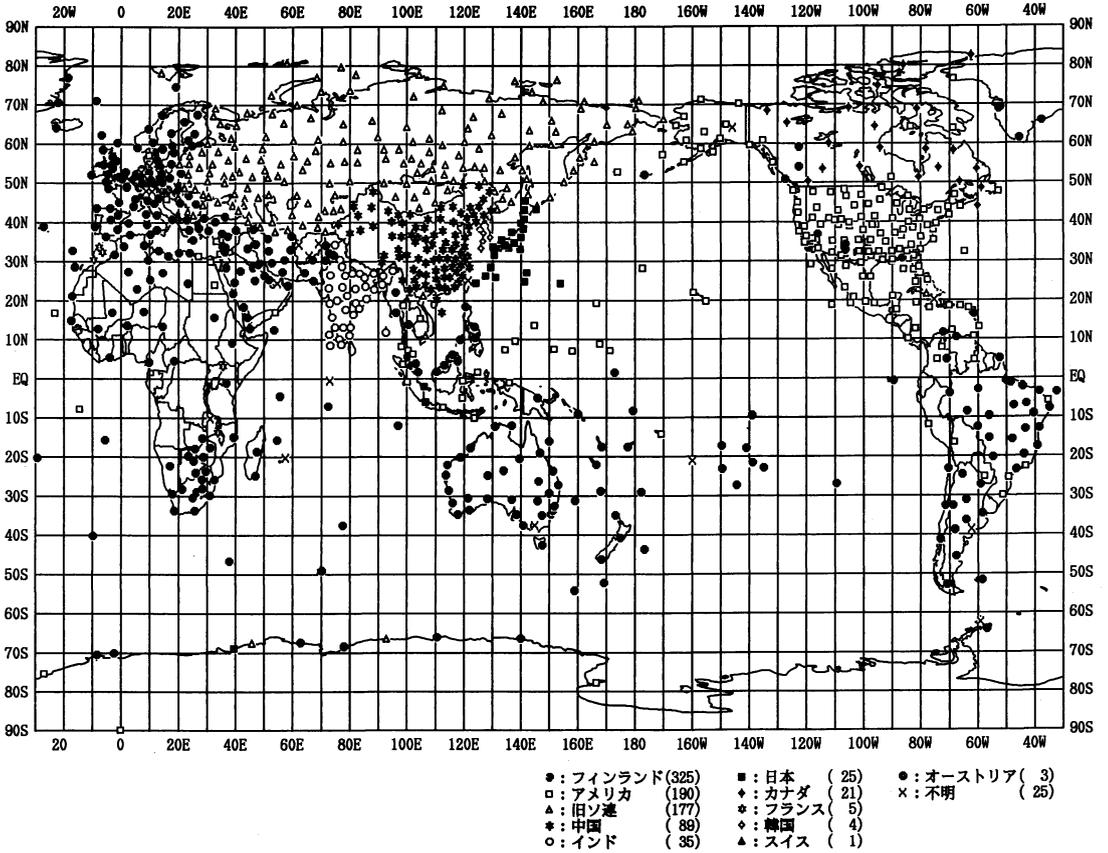
本稿は、数値予報課で行っている日射補正量の算出方法、および客観解析で施される日射補正の手順についてまとめたものである。

* The solar radiation correction scheme in the objective analysis at JMA.

** Hajime Komuro, 気象庁予報部数値予報課.

*** Atsushi Nomura, 気象庁予報部数値予報課.

© 1995 日本気象学会



第1図 世界の観測地点における使用ゾンデ。(WMO ラジオゾンデカタログ (1993) より)

2. 高層観測

2.1 レーウィンゾンデ観測

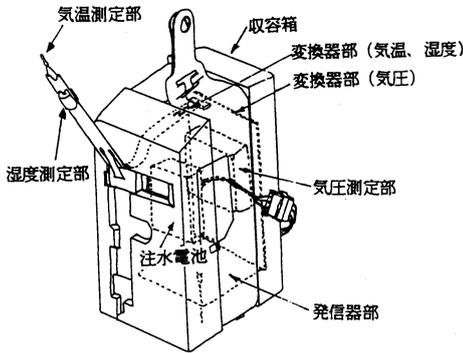
レーウィンゾンデ観測は、気球の下に観測機器（以下ゾンデと略す）を吊り下げ、上空の気圧、気温、湿度を観測し、またこのゾンデを追跡することで風向・風速を求めるものである。その観測データは、TEMP報としてGTS回線を通して報じられている。この電報の他に、上空の風向・風速だけを観測するレーウィン観測やパイボール観測で得られた観測データは、PILOT報として通報されている。

WMO 測器観測法委員会 (CIMO) では、世界の高層観測地点で使用しているゾンデや設備をまとめ、ラジオゾンデカタログ (WMO, 1986, Kitchen, 1989, Oakley, 1993) として発行している。最新のラジオゾンデカタログに掲載されている観測地点を第1図に示してある。観測地点を示すシンボルは使用しているゾンデの製造国を表しており、右下にその国名と使用地

点数を記載している。フィンランド製レーウィンゾンデが世界的に広く使用されており、日本製レーウィンゾンデはインドネシアも含め25地点で使用されている。なお、台湾の観測地点は、このカタログには中国として1地点のみ掲載されているだけだが、実際はこの他に数地点からのTEMP報が入電している。

現在世界で使用されているゾンデとしては約20種類あり、搭載されている気圧・気温・湿度の各センサーの種類、および風を測定するための追跡システムの種類を付録に示してある。

第2図に、日本で1992年から導入されているRS2-91型レーウィンゾンデの構造を示してある。搭載している各センサーは、気圧が静電容量変化式空ごう気圧計、気温がサーミスタ、湿度が高分子静電容量式であり、サーミスタには赤外放射による影響を軽減するためにアルミ蒸着してある。また、飛揚時の重さ（吊り紐とパラシュートを含む）が300gと、1981年から



第2図 RS2-91型レーウィンゾンデの構造。

使用しているRS2-80型レーウィンゾンデの半分となったため、到達高度が上がり、10 hPaの観測データがかなり報告されるようになった。

2.2 観測データ

観測で得られたデータは、特異点、指定気圧面、極大風速面、圏界面における各要素の値として求められ、TEMP報として報じられる。特異点とは、その資料だけで大気の状態・湿度ないし風の特性が再現できるように選択されたデータである。また指定気圧面とは、1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 hPaの16面である。

TEMP報は、地上および100 hPaまでの指定気圧面をTEMP-A、地上から100 hPaまでの特異点をTEMP-B、70 hPaから10 hPaまでの指定気圧面をTEMP-C、100 hPaから最終観測点までの特異点をTEMP-Dの4通に分けて報じられる。TEMP-AとCには、極大風速面と圏界面も含まれている。

日本における観測データの処理については、観測部高層課(1987)に掲載されているので、参照してもらいたい。

ジオポテンシャル高度は、気圧センサーを搭載しているか、追跡システムの種類により、

- ①測定した気圧・気温などから、観測地点の標高に順次積算する
- ②2次レーダーを用い、ゾンデまでの直距離と高度角から、高度を算出する

の2通りの算出方法があり、日本のゾンデや世界で最も多く使用されているフィンランドのゾンデは①の積算により算出している。これらの算出式などの説明については、観測部高層課(1987)、Hooper(1986a)を参照願いたい。

第1表 日射による誤差の推定量(°C). (中村他(1983)による)

	太陽高度角(度)	高度(km)							
		0	5	10	15	20	25	30	35
0	0	0.09	0.18	0.31	0.53	0.83	1.21	1.64	2.09
30	30	0.27	0.39	0.56	0.80	1.11	1.49	1.93	2.40
60	60	0.33	0.46	0.66	0.93	1.30	1.75	2.27	2.82
90	90	0.34	0.48	0.68	0.97	1.35	1.82	2.37	2.95

2.3 気温センサーに生ずる誤差

中村他(1983)は、日本のRS2-80レーウィンゾンデの気温センサーであるサーミスタに生ずる各種の測定誤差のうち、サーミスタに入射する各種放射エネルギー(日射、長波放射、ゾンデからの送信電波)、サーミスタ内部に発生するジュール熱、リード線や取付金具を通しての伝導熱、およびセンサーとしての遅れをあげ、その大きさを表す式を導き、評価を行っている。

これらの誤差の評価では、ゾンデからの送信電波は全く無視でき、ジュール熱は無視できるほど小さい。第1表に、中村他(1983)が推定した太陽高度角と高度日射による誤差を示してある。この表は、ゾンデの上昇速度を360 m/分、日射のサーミスタによる吸収率を18%、雲などのアルベドを0.2として算出されている。太陽高度角が高く、高度が高くなるほど日射による誤差が大きくなっている。日射と他の要因の推定量とを比較すると、高度25 kmにおける日射以外の誤差の最大の要因は、長波放射で、その大きさは0.55°C(鹿児島県のデータを用いた計算)であるなど、どの高度においても日射による誤差が他の要因よりも最も大きい。

気温センサーに生ずる誤差のうち、最も寄与の大きい日射誤差について補正されているかどうかは、観測データを使用するに際して、かなり重要なことである。世界の多くの観測地点では、通報前に観測データを処理する段階で補正を実施している。しかし、アメリカ製やインド製のゾンデなどを使用している観測地点では、補正せずに通報している。このように補正と未補正が混在しているデータを使用するには、未補正の観測地点のデータに何らかの方法で補正を施さざるを得ない。また、補正していてもその補正が不適正な地点もあり、その観測データについても補正を行わなければならない。

一方、CIMOでは世界で用いられているゾンデデータの整合性を図るために、1984年以降4回にわたりゾ

ゾンの国際比較を行っている。その比較結果は、ゾンデメーカーにより搭載センサーの改良や観測処理の改善に反映されている。

3. 日射補正量の算出方法

客観解析の日射補正は 150 hPa より上層の指定気圧面の高度と気温について行っており、その補正量は次の式で算出される。

$$\Delta Z = \Delta Z_{\max} \cdot f(\alpha) \quad (1)$$

ここで、 ΔZ_{\max} は夜間の観測データを基準として昼間の観測データのバイアスを地点別に統計した値である。また、 $f(\alpha)$ は日射強度に対応する係数で、ゾンデが指定気圧面に到達したときの太陽高度角 (α) の関数である。この値は、 $0 \leq f(\alpha) \leq 1$ である。

現在の補正量の算出手順は、統計に用いる毎月のデータ蓄積の処理と、一年以上のデータを統計して補正量を算出する処理とに分けられ、データ蓄積および統計は 200 hPa より上層について行っている。

3.1 毎月のデータ蓄積処理

この処理では、日射補正量を算出するための TEMP 報データの蓄積とともに、毎月処理することにより、各観測地点で日射補正が実施されているかを把握することを目的としている。処理の手順は、以下のとおりである。

- (1) 00UTC と 12UTC の TEMP 報データと客観解析値とを比較し、人為的な誤データと判断されるデータを取り除く。
- (2) 00UTC と 12UTC 間の測定値の系統誤差は N 日の連続時系列から評価することができる (Hawson and Caton, 1961) ことから、00UTC の値 (Z_{00}^i) と翌日の 00UTC の値 (Z_{00}^{i+1}) の平均値と、この間の 12UTC の値 (Z_{12}^i) との差 (ΔZ^i) が系統誤差となる。

$$\Delta Z^i = k \{ (Z_{00}^i + Z_{00}^{i+1}) / 2 - Z_{12}^i \} \quad (2)$$

ここで、 k は 00UTC が昼のとき 1、12UTC が昼のとき -1 である。

- (3) (2) 式で求めた差 (ΔZ^i) を 1 か月にわたり平均する (以下統計値という)。

$$\Delta Z_{\text{mean}} = \left(\sum_{i=1}^N \Delta Z^i \right) / N \quad (3)$$

- (4) これをもとに、把握している日射補正の実施状況をチェックし、地点別の日射補正実施情報を変更する。

3.2 日射補正量の算出

上の節で作成した TEMP 報のファイルから日射補正量を算出し、客観解析で使用されるデータセットを作成する。処理の手順は、以下のとおりである。

- (1) 上節で作成した TEMP 報データファイルから、地点別に一年以上にわたる統計値を作成する。統計方法などは、上節で説明したのと同じである。
- (2) 上で求めた地点別の統計値から、補正が必要な国別や地域別の統計値を求める。

- (3) 地点別と国別の統計値 (T_i) の各々に対して、回帰曲線 $T_i^c = A_0 \cdot P_i^{A_1}$ (4)

(A_0 と A_1 は定数)

- 回帰直線 $T_i^l = B_0 + B_1 \cdot \ln P_i$ (5)

(B_0 と B_1 は定数)

の 2 つの回帰式をあてはめ、指定気圧面における値をそれぞれ求める。これは、統計値により近く、かつ補正値が指定気圧面間で整合性をとるためである。また、これらの値を用いて、統計値が得られていない指定気圧面の補正値をも補外する。

- (4) 指定気圧面における 2 つの回帰式の値と統計値との差の平方和

$$\Sigma (T_i - T_i^c)^2 \text{ および } \Sigma (T_i - T_i^l)^2$$

を求める。

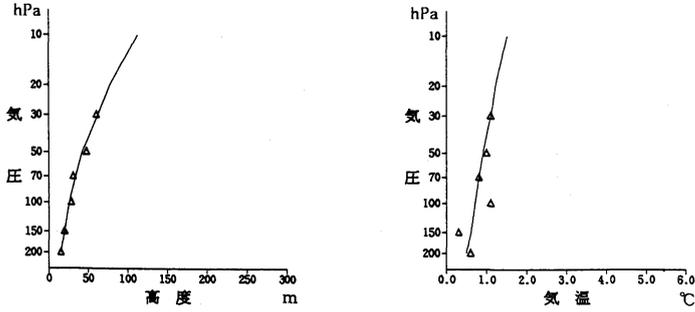
- (5) 指定気圧面における補正値を求める。

統計値のある指定気圧面の補正値は、200 hPa より上層で統計値が得られている指定気圧面が 3 面以上あるときは 2 つの回帰式のうち統計値との差の平方和が小さい方の値を補正値とする。なお、2 指定気圧面以下しか統計値がないときは統計値が得られた指定気圧面も含め、全ての面の補正値をなしとする。

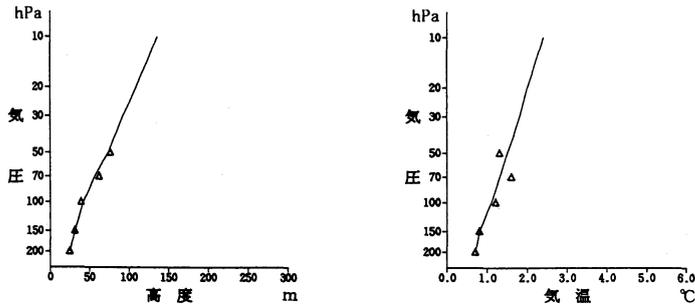
また、統計値のない指定気圧面においては、6 指定気圧面以上の統計値があるときは 2 つの回帰式により外挿した値の平均を、4~5 指定気圧面あるときは回帰直線により外挿した値を補正値とし、3 指定気圧面あるときは、得られた統計値の平均値を全ての面の補正値とする。

- (6) 上で求めた補正値から、客観解析で使用する日射補正量テーブルを作成する。

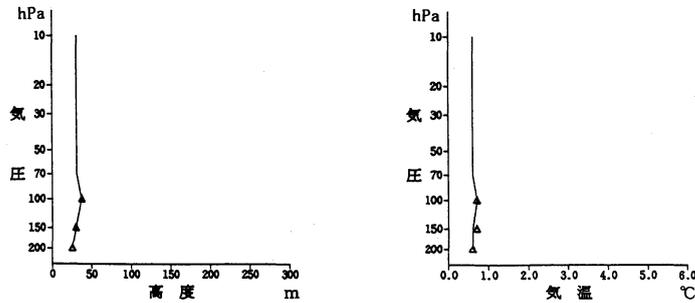
補正値が算出されている地点については、日射補正量テーブルに上で求めた補正値を補正量としてセットされる。補正値が算出されていないときは、その国の補正値をその地点の補正量とする。しかし、国別の補正値も得られていないときは、補正量は設定されない。



13130 (45.49N, 16.02E)



26477 (56.23N, 30.36E)



40179 (32.00N, 34.49E)

第3図 昼夜差の統計値と日射補正値の比較。

△ : TEMP 報の 00UTC と 12UTC の差の統計値
 実線 : 統計値を補外して求めた日射補正値。

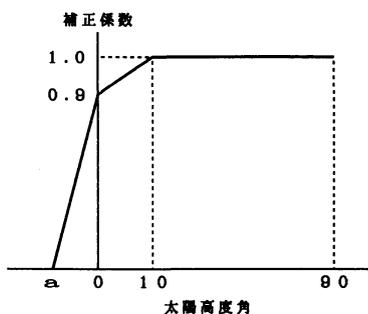
第3図に、地点番号13130, 26477, 40179における高度(左図)と気温(右図)の統計値と上の手順で算出した補正値とを、気圧を縦軸に示してある。得られた統計値を△で示し、補外して得られた補正値を実線で示してある。また、これらの地点の150 hPaより上層の日射補正量を第2表に示す。

4. 日射補正処理の手順

客観解析での日射補正は、TEMP 報の鉛直整合性チェックが終了した後に、150 hPaより上層の指定気圧面の高度と気温について行われている。200 hPaより下層に補正していないのは、補正量が小さく、雲による影響の評価が難しいからである。なお補正の後に、

第2表 日射補正量.

地点番号	高度 (hPa)	補正量						
		150	100	70	50	30	20	10
13130 (クロアチア)	高度 (m)	20	26	34	43	63	78	113
	気温 (°C)	0.6	0.7	0.8	0.9	1.1	1.2	1.5
26477 (ロシア)	高度 (m)	31	43	57	74	93	109	136
	気温 (°C)	0.8	1.1	1.3	1.5	1.8	2.0	2.4
40179 (イスラエル)	高度 (m)	30	37	31	31	31	31	31
	気温 (°C)	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6



$$a = -8 : \text{TEMP-A} \\ -5 : \text{TEMP-C}$$

第4図 太陽高度と日射補正係数.

鉛直の静力学的平衡が成り立つように計算し直すことは行われていない(野村, 1990).

客観解析での気温の補正は、次の手順で実施される。まず、補正が必要な地点の観測時刻および指定気圧面までのゾンデの到達時刻から太陽高度角((1)式の α)を求める。この α から日射強度に対応する係数($f(\alpha)$)を求める。 α と $f(\alpha)$ の関数を第4図に示す。(1)式より ΔZ を算出し、観測値から差し引く。なお、TEMP-Aの指定気圧面で $\alpha < -3$ 度、TEMP-Cで $\alpha < -5$ 度のときは、気温センサーに日射があたる可能性がないため補正は行わない。

高度の補正についても、気温と同様な手順で、補正された指定気圧面間の高度差(層厚)を求め、150 hPaの補正された高度に順次層厚を積み上げ、最終の指定気圧面まで算出される。

5. 日射補正量テーブルの更新

5.1 日射補正実施状況の確認

日射補正量を算出するにあたっては、各観測地点で補正を実施しているかどうかを最も重要なことであ

る。今までは、観測地点や国が補正の実施状況や使用するゾンデを変更しても、WMOなどに連絡されることはなく、CIMOがラジオゾンデカタログを出版したときの調査で把握されていただけであった。WMOへ変更を届けるようになった現在でも、完全に報告されていないようである。この補正状況が正確でないと、補正済みの観測値に更に補正してしまうことになりたりする。そのため、補正状況をできるだけ早く、かつ正確に把握し、客観解析での日射補正の処理に反映しなければならない。3.1節で説明した毎月のデータ蓄積処理時に統計結果のチェックをするのもこのためである。

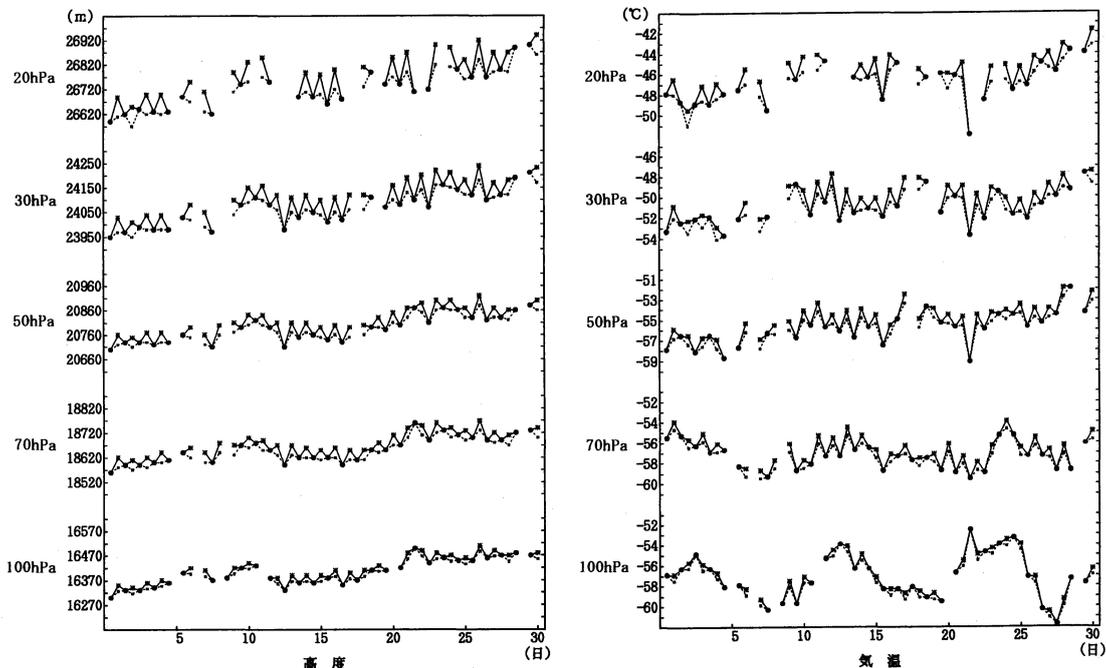
日射補正状況を把握するためには、毎月のデータ蓄積処理結果とともに、WMOなどの資料に注意を払っておき、日射補正量テーブルの更新時に参考としている。今回(1994年3月)の日射補正量テーブルの更新にあたっては、以下の資料を参考とした。

(1) TEMP-Bの31313群

TEMP-Bには、観測システム、日射補正の実施の有無、放球した時刻などを報ずる一群がある。これは、観測地点の補正状況を把握する上では、リアルタイムでその観測地点の補正状況がわかり、かなり有効な情報源である。しかし現在のところ、この群の通報については各国の裁量に任されており、全ての国が通報しているわけではなく、日本でも1994年現在この群は通報していない。

(2) 「ラジオゾンデ測器と実施における歴史的変遷」(Gaffen, 1993)

これは第10回CIMO(1989)で気候問題が議論された際、使用してきた測器と観測の変遷に関するラポータが選任され、このラポータにより各国の回答をまとめた報告書である。この中に、使用している測器の種類や日射補正の実施についても記載されており、有効な情報源である。タイが時



第5図 観測値(実線)と補正後の値(点線)の時系列。(06610(46.8N, 6.9E) 1993年6月1日~30日)

間により使用しているゾンデが異なることも、この資料で初めてわかったことである。

5.2 日射補正量の変更

3節の日射補正量算出時の結果と5.1節の補正状況の確認をもとに、観測地点の補正状況を変更した。ここで、旧ソ連の地点は2次レーダーで高度を測定し、かつ気温も日射補正しているはずであるが、WMOは気温と高度にバイアスの大きい地点が含まれており、気温については太陽高度角による系統的なバイアスがあるとも報告している(Oakley, 1993)。更に、我々の行った昼夜差の統計においてもバイアスの大きい地点があり、これらの地点には補正を施す必要があるとした。

この補正状況を用い、1991年9月から1992年8月における1年間の昼夜差の統計値を作成し、日射補正量の算出を行った。この新しい日射補正量は、1994年3月9日00 UTCから客観解析ルーチンで使用されている。補正状況を変更したことにより、前回(1990年作成)との違いが生じた。また、統計値の得られた指定気圧面の数が異なること、統計値から補正值への算出方法が一部変更されたことから、補正量が前回と大きく違う地点も現れた。

例えば、エジプトやインドネシアでは、前回統計値が得られなかった高度・気温の補正值とも、今回は算出された。また、メキシコは統計期間中12 UTCのみの通報値しかなく、今回は補正值が作成されなかった。前回日射以外の誤差が大きいとして算出しなかったインドについても算出を行ったが、気温については補正值が得られたものの、高度は150 hPaまで到達しているデータが少なく統計値が得られなかった。

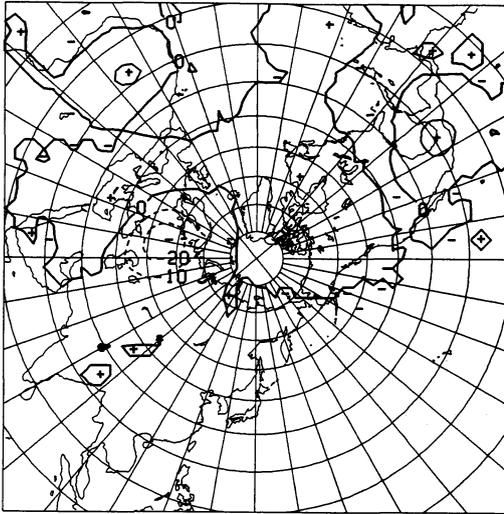
6. 算出した補正量

6.1 観測地点別の補正状況

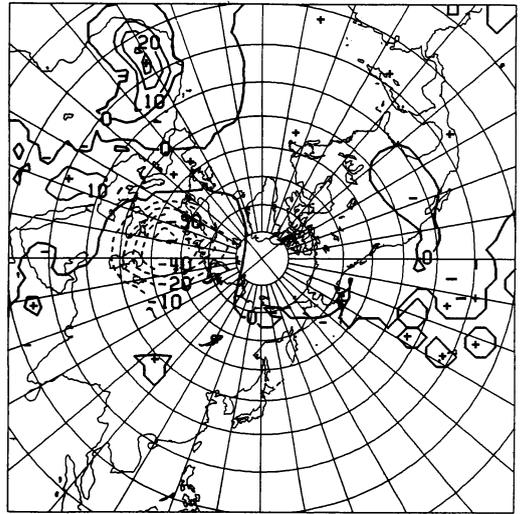
TEMP報で報じられた観測値と上に述べた日射補正を施した後の値をプロットしたものを第5図に示す。06610(スイス)の1993年6月における100~20 hPaの高度(左図)と気温(右図)の観測値(実線)と補正結果(点線)である。○が00 UTCの観測値、*が12 UTCの観測値である。

12 UTCが昼間のため、夜間である00 UTCの観測値に比べ日射の影響により高い値となっている。00 UTCは夜間のために補正されておらず、12 UTCのみ補正されている。ところどころデータが抜けているのは、電報が入電しなかったり、ゾンデが到達しない

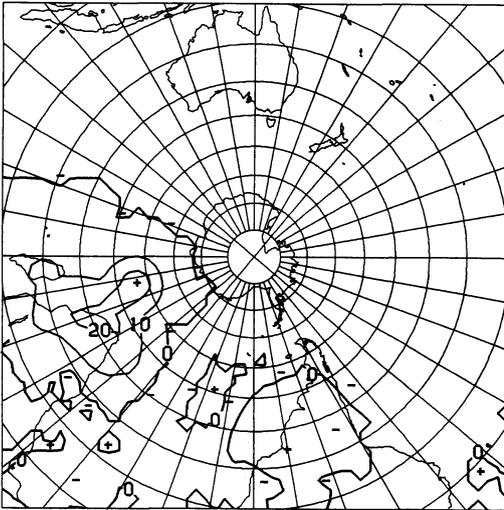
(a) 北半球



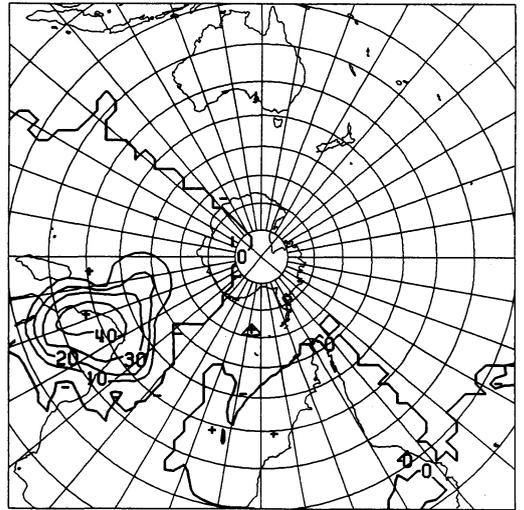
(b) 北半球



南半球



南半球



第6図(a) 新旧補正値を用いた解析の比較. 1994年4月29日 12UTC, 100 hPa 高度 (m)
 (b) 新旧補正値を用いた解析の比較. 1994年4月29日 12UTC, 30 hPa 高度 (m)

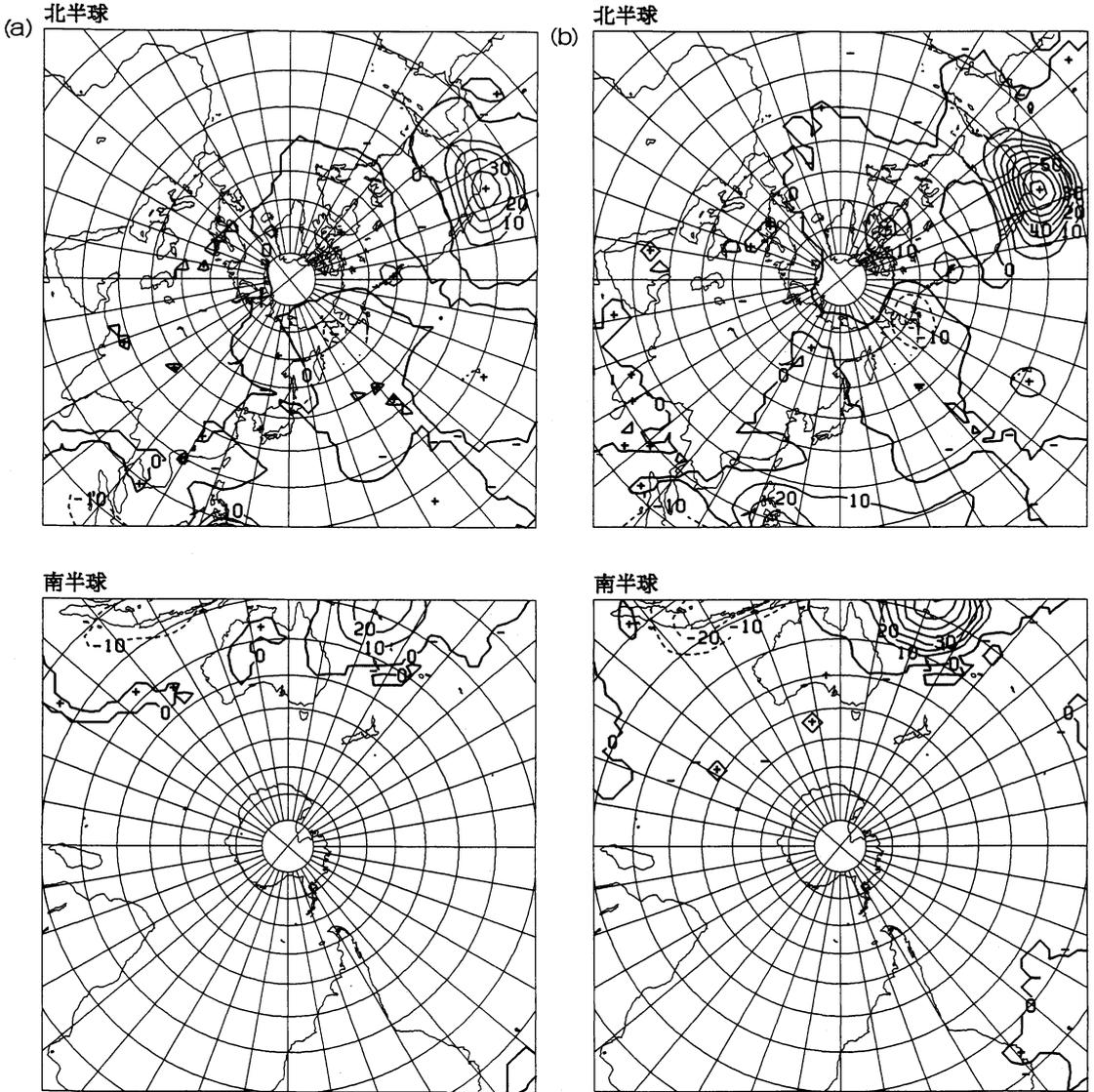
ためである。この図において、高度はほぼ滑らかに補正されているが、気温は補正が過分や不足の日もある。

6.2 新旧補正量の比較

00UTC と 12UTC の全球解析プログラムを用いて、今までの日射補正量を用いた解析を基準として、新しい補正量を用いた解析との違いを見てみた。そのうち、100 hPa と 30 hPa の高度を1994年4月29日 12 UTC について第6 (a) 図と第6 (b) 図に、1994年5月5

日 00 UTC について第7 (a) 図と第7 (b) 図に示した。各図の上図が北半球、下図が南半球である。高度の等値線は 10 m ごとに描いてある。新しい補正量を用いた解析値から今までの補正量を用いた解析値を差し引いた値が正であるのを実線で、負であるのを点線で示してある。

これらの図から、負の地域、すなわち新しい補正量を用いて解析した高度が低くなっている地域が、ウラ



第7図(a) 新旧補正値を用いた解析の比較. 1994年5月5日 00UTC, 100 hPa 高度 (m)
 (b) 新旧補正値を用いた解析の比較. 1994年5月5日 00UTC, 30 hPa 高度 (m)

ル山脈付近, インドネシア付近, アラスカに見られる。解析した高度が高くなった地域が、アフリカ北部・西部, 南アフリカ, カナダ北東部, メキシコ付近, フィリピン, 南太平洋域である。これらの地域のうち, ウラル山脈付近, アフリカ北部・西部, 南アフリカ, フィリピン, 南太平洋域は補正実施状況の変更により偏差が生じた地域であり, 他の地域は前回の補正量との違いのためである。ただ, カナダ北東部は, 両方が加味

されていると思われる。

気温については(図は省略), 補正実施状況を変更したインドとアフリカ北部で 1°C 以上新しい解析値が低くなっている。また, メキシコ付近は補正値が得られなくなったことより, 新しい解析値が高くなっている。

このように, 日射補正を変更したことにより解析値が異なる地域が現れたが, 日々の客観解析では現実に即した補正状況により, 信頼度の確かな解析となった。

しかし、この解析値を平年差や長期トレンドとして表現するときは、補正量変更によりギャップが生ずる地域のあることに留意しなければならない。

7. 新たな情報と今後の問題点

7.1 日射補正の実施に関する情報

1993年にラジオゾンデカタログ (Oakley, 1993) が4年ぶりに更新され、今後記載内容に変更があったときにはWMOへ報告されることになり、各国への通知も行われることとなった。これが確実に実行されると、各国の補正状況が多少の遅延はあるとしても的確に把握できることになる。

特に、アメリカの National Weather Service (NWS) の26地点では、1994年の春の終わるか夏の初めにフィンランド製のゾンデを導入する計画があり、2~4年後には残りの69地点も、補正したデータを送信できるよう観測システムの更新が計画されている (WMO, 1994)。これが実施されると、アメリカ国内ではNWSの管轄で、日射補正を実施している地点と、日射補正を実施していない地点が混在することとなる。NWSの管轄している地点でいつから日射補正を実施して報ずるか事前には連絡がなく、できるだけ早く把握し、日射補正テーブルを更新する必要がある。1994年8月のTEMP-Bの31313群で見ると、NWSの地点は日射補正を実施していない。代わりに、カナダでゾンデをフィンランド製に変更し、かなりの地点で日射補正を施して報じているが、これはWMOから連絡はなかった。

7.2 日射補正值算出に関する問題点

現在の補正值算出方法は、夜間の観測値を基準とし、昼間の観測値の補正值を統計的に算出しているため、昼夜とも観測値が得られない観測地点については補正值を算出できない。日射補正が必要だとわかっている観測地点でも、補正できないことになる。また、今まで未補正だったのが、補正を施して報じられると、その変更を確認するまでの間、不必要な補正が施されることになる。この期間をできるだけ短くすることが必要である。

また現在は、統計値が大きな正の値 (昼間の観測値が夜間よりも高い) となったときのみ補正量を求めており、負の値 (昼間が夜間よりも低い) となっても補正を行っていない。これは、逆補正が正しいという保証がないためである (野村, 1990)。昼間の観測値が夜間よりも低くなるのは、夜間の観測値に長波放射に

よる補正を過分に行っていることが一つには考えられ、1993年にフィンランド製ゾンデの補正スキームの更新はこの理由によるものであった (Oakley, 1993)。これ以外に説明されることがあるか、更に検討が必要である。

更に日射補正処理においては、150 hPaより上空の指定気圧面での放球からの到達時間を用い、そこでの太陽高度角により補正係数を算出している。放球から指定気圧面までの到達時間は、1986年のラジオゾンデカタログのデータを用いている。気球の大きさや充填気体の量の変更され、放球からの到達時間も変わっていることも考えられ、検討が必要である。

今まで述べた補正量の算出方法には、大気潮汐による影響を全く考慮に入れていない。今後大気潮汐に伴う観測値への見積もりができるようになったときは、これを考慮に入れることが必要となろう。

8. おわりに

これまで述べてきたように、数値予報課ではゾンデに生ずる系統的な誤差の中で日射による影響のみを取り除いている。しかし、実際には、長波放射によると考えられるもの (夜間の気温を昼間に比べると正のバイアスがある)、観測システムによるものとしか考えられない誤差なども無視できないことがわかっている。アメリカ気象センター (NMC) では、ゾンデの系統誤差の補正を日射補正の概念からバイアス補正の概念へと拡張して、観測値と第一推定値 (前回の解析値を初期値とした6時間予報値) との系統誤差は観測システムによるバイアス成分であるとして補正すべき量と定義し、観測値に補正処理を行っている (Julian, 1991)。これは、客観解析の第一推定値にバイアスが含まれないと仮定したものであるが、予報モデルで作られる場にバイアスがないとするのは、たいへん危険な考えである。

しかし、予報モデルによる6時間予報値の精度が観測値と同じ程度までに向上した現在、一概に危険だからと退けるよりは、第一推定値の取扱いの利便性、ゾンデに生ずる影響全てを含めた系統誤差が求まるなどの利点も大きいことを考えると、積極的にこの手法を取り入れる方がメリットが大きいと思われる。数値予報課でも、今後検討すべき手法であろう。

最後に、この報告をまとめるにあたり、佐藤数値予報班長はじめ課内の皆さんの助言に感謝します。また、観測部高層課には快く資料を提供していただき、特に

安倍補佐官にはゾンデのセンサー等についての御教授もいただいたことに感謝の意を表します。

参考文献

- Call, D. B., 1994 : A New GPS Rawinsonde System, WMO Instruments and Observing Methods Report, No. 57, 159-163.
- Gaffen, D. J., 1993 : Historical Changes in Radiosonde Instruments and Practices, WMO Instruments and Observing Methods Report, No. 50.
- Hawson, C. L. and Caton, P., 1961 : A synoptic method for the international comparison of geopotential observations, Meteor. Magazine, London, 90, 336-344.
- Hooper, A. H., 1986 a : Algorithms for Automatic Aerological Soundings, WMO Instruments and Observing Methods Report, No. 21.
- Hooper, A. H., 1986 b : WMO International Radiosonde Comparison -Phase I- Beaufort Park, U. K., 1984, WMO Instruments and Observing Methods Report, No. 28.
- Ivanov, A., A. Kats, S. Kurnosenko, J. Nash and N. Zaitseva, 1991 : WMO International Radiosonde Comparison -Phase III- Dzhambul, USSR, 1989 Final Report, WMO Instruments and Observing Methods Report, No. 40.
- Julian, P. R., 1991 : RADCOR 91, the New Radiosonde Radiation Error Correction Procedure, National Meteorological Center Office Note, No. 374.
- Kaisti, K., T. Saarnimo and V. Karttunen, 1994 : Windfinding in Radiosonde Using GPS, WMO Instruments and Observing Methods Report, No. 57, 153-157.
- Kanamitsu, M., 1984 : Data processing, selection and quality control as used at JMA, ECMWF Workshop on the Use and Quality Control of Meteorological Observations, 6-8 Nov. 1984, 369-389.
- Kitchen, M., 1989 : Compatibility of Radiosonde Geopotential Measurements, WMO Instruments and Observing Methods Report, No. 36.
- Nash, J. and F. J. Schmidlin, 1987 : WMO International Radiosonde Comparison (U. K. 1984, U. S. A. 1985), Final Report, WMO Instruments and Observing Methods Report, No. 30.
- Oakley, T., 1993 : Report by the Rapporteur on Radiosonde Compatibility Monitoring Part A : WMO Catalogue of Radiosondes and Upper-air Wind System in Use by Members (1993) ; Part B : Compatibility of Radiosonde Geopotential Measurements 1990, 1991 and 1992, WMO Instruments and Observing Methods Report, No. 56.
- Schmidlin, F. J., 1987 : Report of Phase II of the WMO International Radiosonde Intercomparison Held at Wallops Island, Virginia, USA, WMO Instruments and Observing Methods Report, No. 29.
- WMO, 1982 : Guide on the Global Data-Processing System, WMO No. 305.
- WMO, 1986 : WMO Catalogue of Radiosondes and Upper-air Wind System in Use by Members, Instruments and Observing Methods Report, No. 27.
- WMO, 1994 : Operational Newsletter, Volume 1994, No. 4.
- 観測部高層課, 1987 : 高層気象観測の自動化, 測候時報, 54, 225-262.
- 柏木啓一, 1990 : 気象データと客観解析, 数値予報課報告・別冊第36号, 気象庁予報部, 16-46.
- 鈴木 茂, 旭 満, 1978 : ラジオゾンデのつりひもの長さの変化における日射の気温測定に及ぼす影響, 研究時報, 30, 93-97.
- 中村匡善, 林 則雄, 増田一彦, 1983 : RS 2-80 型レーウィンゾンデの気温センサーに生ずる種々の誤差の見積もりについて, 測候時報, 50, 117-138.
- 野村 厚, 1990 : 気象データと客観解析, 数値予報課報告・別冊第36号, 気象庁予報部, 77-82.
- 和達清夫監修, 1974 : 新版・気象の事典, 東京堂出版.
- 和達清夫監修, 1993 : 最新・気象の事典, 東京堂出版.

付 録

レーウィンゾンデの使用センサーと風の測定システム

世界のレーウィンゾンデに搭載されている気圧, 気温, 湿度の各センサーや, 風を測定するシステムとしては, 以下の種類がある (気象の事典 (和達, 1974, 1993) や観測部高層課から得た資料による)。また, 付録第1表には, 現在使用されている主なゾンデのセン

サーと風の測定システムを主として WMO ラジオゾンデ国際比較の最終報告書 (Hooper, 1986, Schmidlin, 1987, Nash and Schmidlin, 1987, Ivanov *et al.*, 1991) からまとめ, 観測処理における日射補正の有無を含めて示してある。

付録第1表 世界の主なレーウィンゾンデの仕様。(主に WMO ラジオゾンデ国際比較最終報告書より)

ゾンデ名	製造国	気圧センサー	気温センサー	湿度センサー	測風システム	日射補正
Meisei RS2-80	日本	接点式アネロイド	サーミスタ	カーボン抵抗式	方向探知機	有り
Meisei RS2-91	日本	容量式アネロイド	サーミスタ	高分子静電容量式	方向探知機	有り
Vaisala RS80-15N	フィンランド	容量式アネロイド	静電容量型ビード	高分子静電容量式	オメガ測位	有り
Meteorit MARS-2	ロシア	なし	サーミスタ	ゴールド・ビーターズ・スキン	2次レーダー	有り
AVK MRZ-3A	ロシア	なし	サーミスタ	ゴールド・ビーターズ・スキン	2次レーダー	有り
VIZ MARK II	アメリカ	容量式アネロイド	サーミスタ	カーボン抵抗式	ロラン-C測位	無し
SMA-TC-1	中国	なし	サーミスタ	カーボン抵抗式	2次レーダー	有り
SMA-GZZ	中国	符号式アネロイド	バイメタル	ゴールド・ビーターズ・スキン	2次レーダー	有り
India Meteor. Dept. MKIII	インド	接点式アネロイド	サーミスタ	塩化リチウム	1次レーダー	無し
Jin-yang	韓国	接点式アネロイド	サーミスタ	カーボン抵抗式	オメガ測位	無し

1. 気圧センサー

アネロイド型空ごうがほとんどのゾンデに用いられている。空ごうとは、皿状の薄い金属板を組み合わせ、内部を真空状態として密封したものである。

この空ごうの変化を取り出す方式として、電気抵抗の接点板上を接点が移動し抵抗が変化する接点式、コンデンサー容量を変化させる容量式、接触円筒上を接点が移動しモルスの符号が変わる符号式などの方式がある。

2. 気温センサー

半導体であるサーミスタが主流で、他にコンデンサー容量を変化させる静電容量型ビード、膨張係数の異なる金属板を張り合わせたバイメタルなどがある。

日射などによる放射の影響を防ぐため、センサー自体を白色や銀色に塗布または蒸着している。RS 2-80のサーミスタは日射の影響を防ぐために白色に塗装しており、これによる日射の平均吸収率は18%である。また、RS 2-91のサーミスタはアルミ蒸着されており、吸収率は波長により異なるが、平均すると約15%である。このアルミ蒸着により、長波の影響も軽減されている。

3. 湿度センサー

湿度により体積が変化するセルローズ粒子などに炭素粒子を混合させたカーボン湿度計、水分の吸収によ

り高分子膜の誘電率が変化する高分子静電容量式、湿度により伸縮するものとしては毛髪を用いた毛髪湿度計や羊の腸を伸ばしたゴールド・ビーターズ・スキン湿度計があり、また塩化リチウムの水蒸気圧を用いる塩化リチウム湿度計がある。

4. 風の測定システム

ゾンデを追跡し、その位置から上空の風を測定するシステムとしては、方向探知機、Navigation-aid (NAVAID) システム、レーダーによる3種類のシステムがある。

方向探知機のシステムは、ゾンデからの電波を受信し、その方向(方位角と高度角)とゾンデの高さから位置を求めるものである。

NAVAID システムとは、電波を用いる双曲線航行方式によりゾンデの位置を決定するもので、オメガ測位とロラン-C測位がある。

レーダーには、目標からの反射波が受信波となる1次レーダー、送信波が目標に当たると別の信号を送信して受信波となる2次レーダーがある。

また、アメリカやフィンランドでは自動車のナビゲーションシステムなどに用いられる GPS (Global Positioning System) を用いた風観測システムが実用化に向けて研究されている (Kaisti *et al.*, 1994, Call, 1994)。